تهیّه‌ی پوشش مناسب برای مقاومت سیم‌پیچی شده‌ی نیکل-کروم و بررسی گران‌روی و کشش سطحی آن*

مهدی محسنی[۱]	علیرضا میرحبیبی[۲]	حسین قصاعی[۳]

چکیده

در پژوهش حاضر، برای یافتن پوشش مناسب، ترکیب‌های مختلفی از میناها بررسی شد. نتایج نشان دادند که ترکیب حاوی یک درصد وزنی اکسید کبالت و سه درصد وزنی اکسید کروم (E_{6-3Cr}) با دمای پخت ۸۴۰ ºC، ترکیب بهینه‌ای می‌باشد. با بررسی رفتار ذوب ترکیب بهینه به‌کمک میکروسکُپ حرارتی و اندازه‌گیری دماهای انتقال به‌حالت شیشه‌ای، T_g، و نرم‌شوندگی، T_s، و دیلاتومتری، ثابت‌های معادله‌ی VFT تعیین شد. نتایج نشان دادند که گران‌روی پوشش مذاب در دمای پخت برابر با $۱۰^{۳/۸}$ Pa.s، زاویه‌ی تماس یا ترشوندگی مذاب با زیرپایه‌ی سرامیکی °۱۳۵ و کشش سطحی مذاب برابر با ۲۴۵/۱ mN/m می‌باشد.

واژه‌های کلیدی مقاومت سیم‌پیچی شده، مینا، نیکل- کروم، گران‌روی، کشش سطحی.

Preparation of an Appropriate Coating for Ni-Cr Wire-Wound Resistor and Investigation on its Viscosity and Surface Tension

M. Mohseni	A. Mirhabibi	H. Ghasaee

Abstract

In the present work, attempts have been made to find appropriate coating by testing different compounds. Results showed that the optimum enamel is a compound with 1 wt.% cobalt oxide, 3 wt.% chromium oxide (in addition to hundred percent) with the firing temperature of 840 ˚C. Constants of VFT equation were determined by examination of melting behavior of the optimum enamel and measurement of the transition and softening temperatures (T_g and T_s). Results also showed that in the firing temperature, the viscosity of coating is $10^{3.8}$ Pa.s, the contact angle (wetting of melt with the ceramic substrate) is 135° and the surface tension of the melt is 245.1 mN/m.

Key Word Wire-wound resistor, Enamel, Ni-Cr, Viscosity, Surface tension.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ۹۲/۷/۳ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۹/۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) مربی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مقدمه

مقاومت‌های الکتریکی سیم‌پیچی شده به‌دلیل طرّاحی ویژه، دارای توان بالاتری نسبت به سایر مقاومت‌های الکتریکی هستند. این نوع از مقاومت‌ها از یک هسته‌ی سرامیکی و یک سیم‌پیچ فلزی تشکیل شده‌اند. سیم مورد استفاده از انواع المنت‌های دارای مقاومت‌الکتریکی، به‌ویژه آلیاژهای نیکل- کرم، و هسته‌ی سرامیکی به‌شکل لوله یا میله می‌باشد. پُرسلان‌های الکتریکی و استاتیتی، متداول‌ترین هسته‌های سرامیکی به‌کار رفته در این مقاومت‌ها هستند. از مهم‌ترین کاربردهای این مقاومت‌ها می‌توان به استفاده از آن‌ها در صنایع نظامی و استفاده به‌عنوان منبع تأمین گرما اشاره کرد [1-3].

برای محافظت در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت و صدمات مکانیکی، لازم است تا مقاومت پوشش داده شود [1,4,5]. میناهای شیشه‌ای و شیشه‌سرامیکی، متداول‌ترین پوشش به‌کار رفته در این نوع مقاومت‌ها می‌باشند [5,6].

با توجه به تغییر ساختار سیم نیکل- کروم (تاب‌کاری سیم) در دماهای بالاتر از ۸۷۰ ^{o}C و در نتیجه، تغییر مقاومت الکتریکی آن، پوشش اعمال شده می‌باید دارای دمای پختی کم‌تر از این دما باشد [6,7]. عامل مهم دیگری که در پوشش‌دهی آلیاژهای نیکل- کروم مهم است، نفوذ سریع و انحلال کروم موجود در آلیاژ به‌درون پوشش است که می‌تواند تأثیر مهمی بر ترکیب فاز و ریزساختار حاصل داشته باشد [8]. از جمله کارهایی که می‌توان برای حل این مشکل انجام داد، استفاده از میناهای غنی از اکسید کروم [9]، و اکسایش اولیّه‌ی آلیاژ پیش از استفاده از مینا می‌باشد [10]. میناهای به‌کار رفته در تحقیقات انجام شده غالباً حاوی اکسید کروم می‌باشند. محدوده تغییرات اکسید کروم در این میناها کم‌تر از یک تا چهار درصد وزنی گزارش شده است. افزون بر دلیل فوق‌الذکر برای استفاده از اکسید کروم در این میناها، می‌توان به افزایش چسبندگی مینا به سیم و جلوگیری از انحلال سیم حین پخت مینا هم اشاره کرد. از اکسید کبالت نیز به‌عنوان عامل چسبندگی مینا به فلز در این میناها استفاده شده است [11-13]. جدول (۱)، برخی از میناهای گزارش شده در مراجع را نشان می‌دهد [1,4,5,١٤].

از سوی دیگر، شکل هندسی زیرپایه‌ی سرامیکی احتمال ریزش مینا حین پخت را افزایش می‌دهد. در نتیجه، گران‌روی پوشش در دمای پخت بسیار مهم است. به‌همین دلیل، در پژوهش حاضر گران‌روی پوشش نیز بررسی شده است.

در بررسی رفتار ذوب لعاب‌های سرامیکی، چند نقطه‌ی مشخص اهمیّت دارند. با افزایش دما بعد از نقطه‌ی T_g، ذرات تف‌جوشی می‌شوند و گران‌روی به‌سرعت کاهش می‌یابد. با افزایش دما و عبور از نقطه‌ی T_s، کاهش بیش‌تری در گران‌روی قابل مشاهده است و لعاب رفتاری مشابه با یک مایع با گران‌روی بالا از خود بروز می‌دهد. در پیک دمایی پخت لعاب، گران‌روی آن به‌صورت ایده‌آل در بازه‌ی 10^{3}–10^{4} Pa.s می‌باشد. وابستگی گران‌روی به دما در شیشه‌ها و لعاب‌های سرامیکی بعد از دمای T_g و دماهای بالا، با استفاده از معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\log\eta = A + B/T \qquad (۱)$$

که در آن، η گران‌روی مذاب و A و B ثابت هستند. بعد از دمای T_g، گران‌روی حقیقی بزرگ‌تر از آن‌چیزی است که از معادله‌ی (۱) به‌دست می‌آید، زیرا انرژی فعّال‌سازی برای جریانِ ویسکوز ثابت نیست. در معادله‌ی وُگِل- فال‌چر- تامان (VFT, Vogel-Flucher-Tamman)، ثابت T_o به معادله‌ی (۱) اضافه می‌شود:

$$\log \eta = A + B / (T - T_0) \qquad (۲)$$

ثابت‌های معادله‌ی VFT را می‌توان با استفاده از سه نقطه‌ی دمایی مرجع (T_S، T_g و $T_{1/2}$) و معادله‌های (۳)، (٤) و (٥) به‌دست آورد.

$$T_0 = \frac{12T_g - 3.55T_{1/2} + (9.25T_s - 12T_g)\frac{T_{1/2}-T_g}{T_s-T_g}}{8.45 - 2.75\ \frac{T_{1/2}-T_g}{T_s-T_g}}$$
(۳)

$$A = (9.25T_s - 12T_g + 2.75T_0)/ (T_s - T_g)$$
(٤)

$$B = (T_g - T_0)\ (12 - A)$$
(٥)

گران‌روی مذاب را می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری‌های دیلاتومتری و میکروسکُپ حرارتی و بر اساس سه نقطه دمای مرجع تخمین زد. این سه نقطه عبارتند از $\eta = 10^{12}$ Pa.s در نقطه‌ی T_g، $\eta = 10^{9.25}$ Pa.s در نقطه‌ی T_s و $\eta = 10^{3.55}$ Pa.s در نقطه‌ی $T_{1/2}$ (دمایی که در آن، نمونه در میکروسکُپ حرارتی به‌شکل نیم‌کره در می‌آید). شکل نیم‌کره زمانی ایجاد می‌شود که ارتفاع نمونه نصف عرض آن و زاویه‌ی تماس آن با سطح ۹۰° باشد [15,16]. فوجینو و همکاران، پراب‌هو و همکاران و شارتسیس و همکاران، گران‌روی و کشش سطحی شیشه‌های سیلیکات سربی و بُروسیلیکات سربی را بررسی کرده‌اند [17-19].

در پژوهش حاضر، ترکیب مینای مناسب برای پوشش‌دهی مقاومت‌های الکتریکی سیم‌پیچی شده و شرایط پخت آن بررسی شده است. از سوی دیگر، با توجه به این‌که خواص میناهای مذکور تاکنون مطالعه نشده‌اند و در منابع موجود تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب آن‌ها وجود دارد، در این پژوهش برای نخستین بار رفتار ذوب مینای مناسب که یکی از خواص مهم در پوشش‌دهی است، بررسی شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی میناهای گزارش شده در مراجع بر حسب درصد وزنی

اکسید (wt.%)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
PbO	٥٦/٦٩	٥٦/٦٩	٥٦/٦٩	٥٩/٥٢	٣٩	٥٠	٣١/٠٩	–	٤٨/٢٩
SiO_2	١٢/٥٨	١٢/٥٨	١٢/٥٨	٢٦/٩٦	٢١/٥	٢٠	٣٣/٩٢	١٠/٢	٢٧/٥٩
Al_2O_3	٠/٩٩	٠/٩٩	٠/٩٩	٢/٨١	٧	١٢	٢/٩٧	١٣/٨	٥/٥٢
ZnO	٩/٥٤٥	٩/٥٤٥	٩/٥٤٥	–	١٢/٥	–	٢/٣٥	١٧	٤/٤
B_2O_3	–	٨/٤١١	٨/٤١١	٦/٥٣	٢٠	١٤	٢٠/١٩	٣٧/٧	١٤/٢
Na_2O	٣/٢٠٩	٣/٢٠٩	٣/٢٠٩	٠/٦٩	–	٢	–	٤	–
MgO	–	–	–	٠/٦	–	–	١/١٦	١/٥	–
K_2O	–	–	–	١/٥٩	–	–	–	–	–
CaO	–	–	–	٠/٨	–	–	–	٧/٦	–
BaO	–	–	–	–	–	–	٤/٤٤	–	–
NaF	–	–	–	–	–	–	١/٢١	–	–
CaF_2	–	–	–	–	–	–	٢/٢٤	–	–
CoO	–	–	–	٠/٥	–	١	٠/٤٣	٠/٧	–
TiO_2	–	–	–	–	–	١	–	–	–
ZrO_2	–	–	–	–	–	–	–	٧/٥	–
SnO_2	٨/٥٧٩	٨/٥٧٩	٨/٥٧٩	–	–	–	–	–	–
Cr_2O_3	٨/٤١١	–	٠/٥ علاوه بر ١٠٠	–	–	–	–	–	–
مرجع	شاهد	شاهد	شاهد	[1]	[5]	[12]	[1]	[4]	[١٤]

روش‌های آزمایش

در این پژوهش، از سیمی از نوع تجاری با ترکیب ۹۰Ni-۱۰Cr و زیرپایه‌ی چینی الکتریکی صنعتی استفاده شد. برای ساخت پوشش‌ها، ابتدا فریت پوشش‌ها تهیّه شد (انتخاب ترکیب فریت‌های مناسب، با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات مشابه (جدول (۱)) صورت گرفت). کار ساخت فریت، درون بوته‌های شاموتی و در محدوده دمای ۱۲۰۰ ^oC تا ۱۳۰۰ ^oC و با استفاده از کوره‌ی گازی با توقّف ۳۰ دقیقه‌ای در این دما، انجام شد. سرد کردن مذاب آن‌ها، در هوا و بر روی یک صفحه‌ی فولادی انجام شد.

برای تهیّه‌ی دوغاب پوشش‌ها، فریت‌های تهیّه شده ابتدا توسط آسیای ماهواره‌ای آسیا شدند و سپس از درون اَلکی با مِش ۲۰۰ عبور داده شدند. در مرحله‌ی بعد، پودر فریت تهیّه شده با ۰/۱ درصد وزنی چسب کربوکسی متیل سلولز CMC به‌شکل تر مخلوط شد. مواد اولیّه‌ی مورد استفاده برای ساخت پوشش‌ها، ترکیب شیمیایی سیم نیکل- کروم و زیرپایه‌ی چینی، به‌ترتیب در جدول‌های (۲)، (۳) و (٤) آمده‌اند.

پیش از اعمال پوشش، مجموعه‌ی سیم‌پیچ و بدنه ابتدا به‌مدّت زمان ۲ دقیقه در محلول آبی ۱۰ درصد وزنی سود سوزآور (NaOH) در دمای ۸۰ °C غوطه‌ور شد [5]. نمونه‌ها پس از خروج از محیط قلیائی، درون کوره‌ی الکتریکی تا دمای ۲۰۰ °C گرم شدند و در نهایت، سطوح آن‌ها مجدداً با الکل تمیز شد. اعمال پوشش بر روی سیم‌پیچ، با استفاده از قلم‌مو انجام شد و پس از آن، نمونه‌ها در کوره‌ی الکتریکی پخته شدند.

در نهایت، ترکیب‌های فریت E_5 و E_6 به‌دلیل دمای ذوب مناسب (اندازه‌گیری دمای ذوب با استفاده از میکروسکُپ حرارتی انجام شد)، اتصال مناسب با زیرپایه و نداشتن عیب‌های ظاهری، به‌عنوان ترکیب‌های بهینه انتخاب شد. به‌منظور بهبود اتصال بین سیم و پوشش و افزایش ضریب انبساط حرارتی پوشش، از اکسید کروم (۱ تا ۷ درصد وزنی) استفاده شد.

بررسی عوامل مؤثر بر گران‌روی - برای بررسی رفتار ذوب مینا، تعیین ثابت‌های رابطه‌ی VFT و زاویه‌ی ترشوندگی، از میکروسکُپ حرارتی استفاده شد. تعیین دماهای T_g و T_s با استفاده از دستگاه دیلاتومتر مدل 402E ساخت شرکت آلمانی Netzsch انجام شد.

جدول ۲ مواد اولیّه‌ی استفاده شده در این تحقیق

مادّه‌ی اولیّه	مادّه‌ی اولیّه	مادّه‌ی اولیّه	مادّه‌ی اولیّه
سُرنج (اکسید سرب قرمز)	کربنات کلسیم	سیلیس همدان	اکسید کبالت
اسید بوریک	کربنات منیزیم	اکسید تیتانیوم	فلورید سدیم
هیدروکسید آلومینوم	کربنات باریم	اکسید روی	فلورید کلسیم
کربنات سدیم	کربنات پتاسیم	اکسید زیرکونیم	اکسید کروم

جدول ۳ ترکیب شیمیایی سیم نیکل- کروم

عنصر	Ni	Cr	Fe
درصد وزنی	۹۰/٤۲	۹/۲۷	۰/۳۲

جدول ٤ ترکیب شیمیایی بدنه‌ی چینی

اکسید	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3
درصد وزنی	٦۸/٦	۲۱/٥٦	۰/۹۸	۰/۹۸	کم‌تر از ۱/۹٦

نتایج و بحث

انتخاب پوشش بهینه – نتایج مربوط به دمای ذوب و نرم‌شوندگی (حالتی که در میکروسکُپ حرارتی، گوشه‌های نمونه پَخ می‌شود) انواع فریت، در جدول (۵) آورده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دمای ذوب فریت E_7 بالاتر از دمای پخت مناسب می‌باشد و فریت‌های E_1 و E_3 نیز در محدوده دمایی مناسب برای ذوب قرار ندارند (با توجه به ذوب نشدن دو ترکیب فوق در محدوده دمایی مورد نظر، این دو ترکیب در جدول (۵) حضور ندارند). با توجه به دیرگداز بودن اکسید کروم، این رفتار می‌تواند ناشی از حضور این اکسید در فریت باشد، چرا که فریت ۲ که با حذف اکسید کروم از فریت ۱ حاصل شده است، در محدوده دمایی مناسب ذوب شده است. با توجه به این نکته، اکسید کروم به‌عنوان یک افزودنی به فریت‌ها در نظر گرفته شد.

پخت میناها یا پوشش نهایی (فریت‌ها همراه با اکسید کروم) نشان داد که فریت E_6 حاوی ۳ درصد وزنی اکسید کروم، مطلوب‌ترین پوشش است. بنابراین، این پوشش ($E_{6\text{-}3Cr}$) به‌عنوان ترکیب نهایی انتخاب شد.

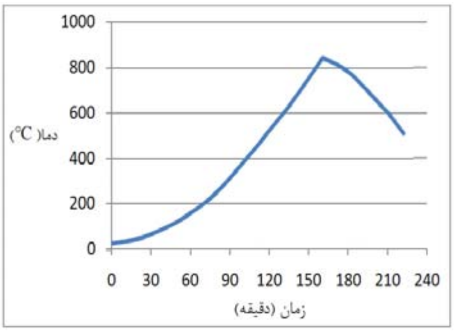
تعیین دما و زمان توقّف بهینه برای پخت پوشش $E_{6\text{-}3Cr}$، با پخت نمونه‌ها در شرایط مختلف و بر اساس اندازه‌گیری‌های میکروسکُپ حرارتی انجام شد (جدول ٦). در نهایت، شرایط بهینه‌ی پخت در دمای ۸۴۰ °C به‌مدّت زمان ۲ دقیقه به‌دست آمد. نمودار مربوط به شرایط بهینه‌ی پخت، در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۵ دماهای نرم‌شوندگی و ذوب فریت‌ها

کد فریت	E_2	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
دمای نرم‌شوندگی (°C)	٦۵۰	٦۵۰	۷۰۰	٦۵۰	۸۰۰	۷۵۰	۷۰۰
دمای ذوب (°C)	۷۷۰	۷۲۵	۷۵۰	۷۵۰	۸٦۰	۸۳۰	۷۵۰

جدول ٦ شرایط پخت پوشش $E_{6\text{-}3Cr}$

دمای پخت (°C)	زمان توقّف در دمای بیشینه (دقیقه)	محیط سرمایش
۸۰۰	۰	هوا
۸۰۰	۱۰	هوا
۸۰۰	۱۰	کوره
۸٤۰	۲	کوره



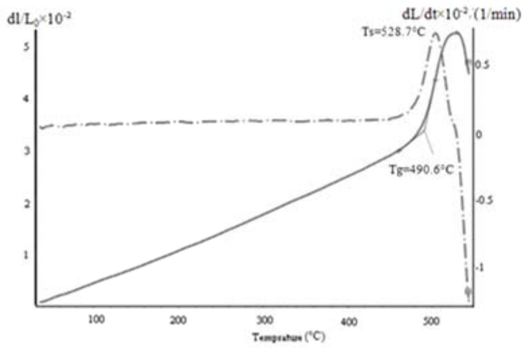
شکل ۱ نمودار پخت نمونه‌ی $E_{6\text{-}3Cr}$

همان‌گونه که در جدول (٦) دیده می‌شود، نمونه‌ها در شرایط مختلفی از دما، زمان و محیط سرد شدن پخته شده‌اند. نمونه‌ی $E_{6\text{-}3Cr}$ ابتدا در دمای ۸۰۰ °C و بدون توقّف پخته شد. نتیجه‌ی پخت مینا در این دما از نقطه نظر اتصال مینا به زیرپایه رضایت‌بخش بود، امّا از نظر ظاهری چندان مطلوب نبود. این نقص احتمالاً ناشی از افزایش گران‌روی مینا با افزودن اکسید کروم به آن بوده است که مانع از خروج کامل حباب‌های هوای محبوس شده گردیده است. برای بهبود ظاهر نمونه، ابتدا مدّت زمان توقف در پیک دمایی پخت تا ۲ دقیقه افزایش یافت، امّا این مدّت نگه‌داری کافی نبود و به‌این ترتیب، زمان توقّف افزایش یافت. نتیجه‌ی پخت به‌مدّت ۱۰ دقیقه در دمای ۸۰۰ °C هم رضایت‌بخش نبود. بنابراین، در مرحله‌ی بعدی، از افزایش دما به‌عنوان عامل کاهنده‌ی گران‌روی استفاده شد. با توجه به افزایش نسبتاً سریع سیالیّت مذاب با افزایش دما از ۸۰۰ °C به بعد و احتمال ریزش مینا، رفتار مذاب حین گرمایش درون کوره به‌طور پیوسته کنترل شد و در نهایت، دمای ۸٦۰ °C به‌عنوان دمای مناسب (بدون زمان توقّف) در نظر گرفته شد. امّا، با توجه به آنچه پیش‌تر در رابطه با دمای تاب‌کاری سیم نیکل-کروم گفته شد، می‌توان گفت که دمای ۸٦۰ °C دمای بالایی برای پخت می‌باشد. بنابراین، دمای پخت تا ۸٤۰ °C کاهش داده شد و این دما و زمان توقّف در آن به‌میزان ۲ دقیقه، به‌عنوان شرایط پخت بهینه انتخاب شد. در رابطه با محیط سرمایش هم مشاهده شد که چگونگی سرمایش تأثیر چندانی بر اتصال مینا ندارد، امّا با توجه به این‌که مقاومت‌ها پس از ساخت می‌باید تحت آزمون شوک حرارتی نیز قرار گیرند، احتمالاً سرمایش درون کوره به‌دلیل کاهش تنش‌های ایجاد شده در نمونه در مقایسه با سرمایش سریع، می‌تواند نتیجه‌ی مطلوب‌تری داشته باشد.

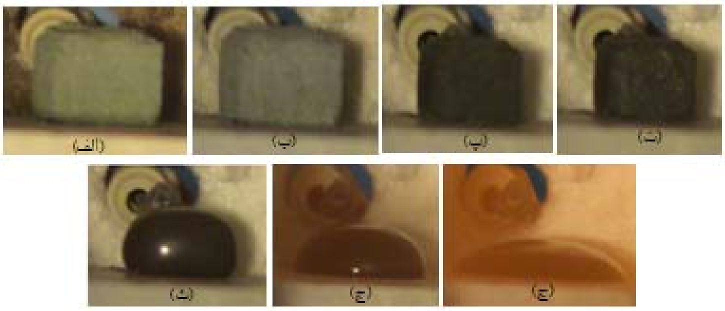
گران‌روی

برای تعیین ثابت‌های معادله‌ی VFT در مورد نمونه‌ی بهینه، دماهای مرجع با استفاده از نمودار دیلاتومتری (شکل (۲)) و تصویرهای میکروسکُپ حرارتی (شکل (۳)) مشخص شدند. شکل (۲)، تغییرات طول نمونه را نسبت به طول اولیّه‌ی آن (محور عمودی سمت چپ) و نیز مشتق این تغییرات نسبت به زمان (محور عمودی سمت راست) را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۳)، مراحل مختلف پخت مینای E6-3Cr از دمای محیط تا ذوب کامل در میکروسکُپ حرارتی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پیش از رسیدن به دمای نرم‌شوندگی در نمودار دیلاتومتری (~۵۳۰ °C)، تغییر خاصی در ابعاد نمونه مشاهده نمی‌شود که این، نشان‌دهنده‌ی عدم اتصال ذرات به‌یک‌دیگر است. البته، تغییر جزئی در ابعاد به‌دلیل افزایش دما منطقی است. امّا، از این دما به بعد (~۵۵۰ °C)، کاهش ابعاد آغاز می‌شود و این، نشان‌دهنده‌ی شروع اتصال ذرات به‌یک‌دیگر و یا آغاز فرایند تف‌جوشی مینا می‌باشد. ذوب مینا در دمای ٦٤۰ °C شروع شده است (شروع پخ‌شدگی گوشه‌های نمونه) و در دمای ۸۵۰ °C به پایان رسیده است (تبدیل نمونه به یک‌سوم کره). با توجه به تصویرهای ارائه شده، مشاهده می‌شود که زاویه‌ی تماس مینا با زیرپایه در دمای ۷۸٤ °C تقریباً ۹۰° می‌باشد. در نتیجه، این دما به‌عنوان دمای نیم‌کره شدن مینا در نظر گرفته شد.

دماهای مرجع و ثابت‌های محاسبه شده (با استفاده از رابطه‌های (۳)، (٤) و (۵)) در جدول (۷) گزارش شده‌اند.



شکل ۲ نمودار دیلاتومتری نمونه‌ی $E_{6\text{-}3Cr}$



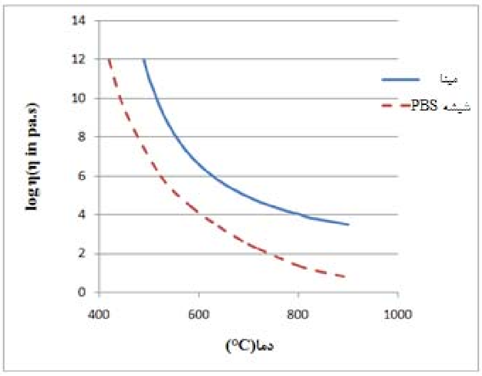
شکل ۳ تغییرات نمونه‌ی $E_{6\text{-}3Cr}$ از دمای محیط تا ذوب کامل در میکروسکُپ حرارتی؛ الف) دمای محیط، ب) شروع تف‌جوشی در ۵۵۰ °C، پ) پایان تف‌جوشی در ٦۳۵ °C، ت) شروع ذوب در ٦٤۰ °C، ث) حداقل سطح تماس در ۷۱۰ °C، ج) نیم‌کره در ۷۸٤ °C، چ) پایان ذوب (تبدیل به یک‌سوم کره) در ۸۵۰ °C

جدول ۷ دماهای مرجع و ثابت‌های محاسبه شده‌ی معادله‌ی VFT

دماهای مرجع(°C)			ثابت‌های معادله‌ی VFT		
				A	B
٤۹۰/٦	۵۲۸/۷	۷۸٤	۳۷۸/۲	۱/۱	۱۲۲۱/۰

شکل (٤)، تغییرات گران‌روی را با دما برای مینای $E_{6\text{-}3Cr}$ و شیشه‌ی بُروسیلیکات سرب (PBS) که با استفاده از نتایج استخراج شده از مرجع [17] رسم شده است، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودارهای گران‌روی این دو ماده شبیه به یک‌دیگرند، با این تفاوت که نمودار مربوط به مینا نسبت به شیشه به دماهای بالاتر انتقال یافته است. این انتقال به‌آن معناست که در یک دمای خاص، گران‌روی مینا بیش از شیشه است. این اختلاف با توجه به ترکیب شیمیایی شیشه‌ی بُروسیلیکات سرب ($63PbO\text{-}25B_2O_3\text{-}12SiO_2$، بر حسب درصد وزنی)، منطقی به‌نظر می‌رسد [17]، زیرا مقدار سیلیس SiO_2 در مینا که افزایش دهنده‌ی گران‌روی است، نسبت به شیشه افزایش یافته است و در مقابل، اکسید سرب و اکسید بور که کاهنده‌ی شدید گران‌روی هستند، در مینا کاهش یافته است. افزون بر این، مینا حاوی مقادیر نسبتاً بالایی از اکسیدهای آلومینیم (۱۲ درصد وزنی) و کروم (۳ درصد وزنی) می‌باشد که می‌توانند گران‌روی را باز هم

افزایش دهند [۱۴]. با توجه به نتایج در شکل (۴)، گرانروی مینای مذاب در پیک دمایی پخت (۸۴۰ °C) برابر با Pa.s $۱۰^{۳/۷۸۱}$ می‌باشد. گرانروی به‌دست آمده در این دما، در بازه‌ی گرانروی ایده‌آل برای مذاب‌ها در پیک دمایی پخت (یعنی Pa.s $۱۰^{۴}$–$۱۰^{۳}$، [15]) قرار دارد و تقریباً با گرانروی مناسب برای نقطه‌ی کاری (یعنی Pa.s $۱۰^{۳}$) برابر است [۲۰].



شکل ۴ تغییرات گرانروی نمونه‌ی E_{6-3Cr} با دما در مقایسه با شیشه‌ی بُروسیلیکات سرب

دماهای نرم‌شوندگی و ذوب به‌دست آمده نشان می‌دهند که مینا دارای محدوده دمایی پخت وسیعی است (~۸۴۰–۶۴۰ °C). این برای مینا یک مزیّت به‌حساب می‌آید، زیرا امکان پخت آن در یک محدوده دمایی وسیع، بدون ایجاد عیب، فراهم می‌شود [۱۴].

کشش سطحی و زاویه‌ی تماس. برای محاسبه‌ی کشش سطحی، می‌توان از رابطه‌ی (۶) استفاده کرد که حاصل جمع کشش سطحی را بر حسب mN/m نشان می‌دهد [21]:

$$\gamma_g = \sum_{i=1}^{n} a_i \gamma_i \qquad (۶)$$

که در آن، a_1 ، a_2، $a_۳$، ... و a_n درصد وزنی اکسیدهای موجود در لعاب و γ_1، γ_2، $\gamma_۳$، ... و γ_n ضریب‌های کشش سطحی اکسیدها در دمای ۹۰۰ °C می‌باشند.

کشش سطحی در بقیه‌ی دماها (F_T)، با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود [21]:

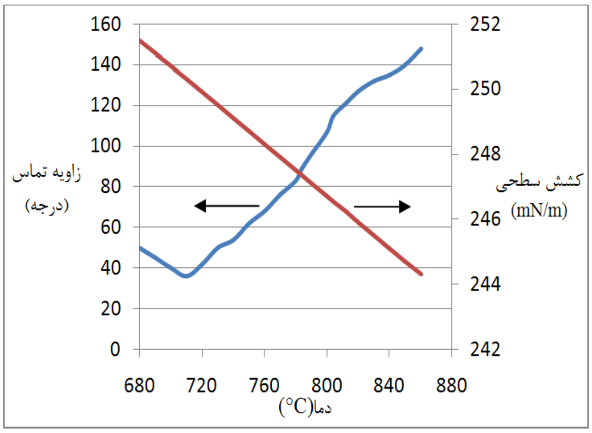
$$\gamma_{GFT} = \gamma_{g900} - 0.04(F_T - 900) \qquad (۷)$$

که در آن، γ_{GFT} کشش سطحی در دمای دلخواه F_T می‌باشد. برای تعیین زاویه‌ی تماس بین نمونه‌ی E_{6-3Cr} و پایه‌ی چینی، از تصویرهای تهیّه شده با میکروسکُپ حرارتی استفاده شد (شکل‌های (۳) و (۵)).

در شکل (۶)، تغییرات زاویه‌ی تماس (ترشوندگی) و کشش سطحی مذاب با دما نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، روند تغییرات کشش سطحی و زاویه‌ی تماس با دما عکس یک‌دیگرند. مشاهده می‌شود که کشش سطحی با افزایش دما به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۵ تصویرهای میکروسکُپ حرارتی از نمونه‌ی E_{6-3Cr} ذوب شده بر روی پایه‌ی چینی برای تعیین زاویه‌ی تماس؛ الف) ۶۸۰ °C، ب) ۷۰۰ °C، پ) ۷۴۰ °C، ت) ۷۶۰ °C، ث) ۷۸۰ °C، ج) ۸۰۰ °C، چ) ۸۲۰ °C و ح) ۸۴۰ °C



شکل ٦ تغییرات زاویه‌ی تماس و کشش سطحی مربوط به مینای $E_{6\text{-}3Cr}$ با دما

نمودار تغییرات زاویه‌ی تماس با دما نشان می‌دهد که با افزایش دما در محدوده دمایی ٦٨٠ °C تا ٧١٠ °C (از نقطه‌ی نرم‌شوندگی تا دمایی که نمونه کروی شکل می‌شود)، زاویه‌ی تماس کاهش می‌یابد و در دمای ٧١٠ °C به کم‌ترین مقدار خود (٣٦ درجه) می‌رسد. در واقع در این حالت، سطح تر نمی‌شود. دلیل این پدیده آن است که مینا در طول فرایند ذوب شدن، فازی از جنس ماده‌ی مرکب تشکیل می‌دهد که مخلوطی از جامد و مایع است. هنگامی که فاز مذاب ظاهر می‌شود، انقباض (گرد شدگی)کمی را می‌توان در ناحیه‌ی تماس بین مینا و زیرپایه مشاهده کرد (شکل (٣- ت)). با افزایش دما در مرحله‌ی اولیّه‌ی ذوب شدن (از شروع نرم‌شدگی تا رسیدن به حداقل زاویه‌ی تماس)، زاویه‌ی تماس بین مینا و زیرپایه کاهش می‌یابد و شکل نمونه به سمت کروی پیش می‌رود. بیش‌ترین میزان کروی شدن زمانی است که زاویه‌ی تماس به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. در این دما، مقدار مذاب ایجاد شده که به نیروهای فصل مشترک داخلی جامد- مایع وابسته است، به‌اندازه‌ای است که می‌تواند بیش‌ترین هم‌بستگی را در نمونه ایجاد کند. با افزایش بیش‌تر دما که با افزایش مقدار مذاب و کاهش گران‌روی همراه است، نیروهای فصل مشترک داخلی کم‌تر می‌شود و در نتیجه، نیروهای هم‌بستگی کاهش می‌یابند. در این مرحله از فرایند، نیروهای تماسی فصل مشترک مینا- زیرپایه افزایش می‌یابند. زاویه‌ی تماس بین مینا و زیرپایه به‌دلیل ترشوندگی افزایش می‌یابد، تا این‌که زاویه‌ی تماس به °۹۰ (نیم‌کره) برسد. هنگامی که دما از مقدار مربوط به حالت نیم‌کره فراتر می‌رود، زاویه‌ی تماس از °۹۰ بیش‌تر می‌شود [16].

زاویه‌ی تماس با سطح در دمای ٧٨٤ °C تقریباً °۹۰ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی حالت نیم‌کره است. پوشش در دمای پخت (٨٤٠ °C) کاملاً ذوب می‌شود و زاویه‌ی تماس نیز برابر با °١٣٥ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی ترشوندگی مناسب سطح توسط مذاب است. باید توجه کرد که زاویه‌ی تماس در نقطه‌ی ذوب به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد و سطح را کاملاً می‌پوشاند. مقادیر کشش سطحی محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط شارتسیس و همکاران در مورد شیشه‌های سیلیکات سربی اختلاف چندانی ندارند [19]. بالا بودن کشش سطحی را می‌توان به نوع ترکیب مینا مربوط دانست. به‌طور کلی، میناهایی که گران‌روی بالایی دارند از کشش سطحی بالایی نیز برخوردارند. با توجه به این‌که مینا دارای مقدار زیادی اکسید آلومینیم است و اکسید آلومینیم پس از اکسید منیزیم بالاترین ضریب دیتزل (Dietzel factor) کشش سطحی را دارد

و نیز، با توجه به حضور اکسید کروم با تأثیری مشابه با اکسید آلومینیم در افزایش کشش سطحی، این رفتار منطقی به‌نظر می‌رسد. البته با وجود بالا بودن کشش سطحی مینا، مشاهده می‌شود که ترکنندگی مینا قابل-توجه است. از سوی دیگر، بالا بودن کشش سطحی می‌تواند میزان تبخیر و فراریّت اجزای مینا را کاهش دهد [19].

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پس از بررسی پوشش‌های مختلف، پوشش مناسب بر اساس دمای پخت و اتصال به زیرپایه انتخاب شد. نتایج تحقیق نشان دادند که مینای E_6 حاوی ۳ درصد وزنی اکسید کروم دارای خواص مناسبی است. نتایج نشان دادند که شرایط پخت برای مینای انتخاب شده، توقّف به‌مدّت ۲ دقیقه در دمای ۸٤۰ °C می‌باشد. بررسی رفتار ذوب پوشش با استفاده از میکروسکُپ حرارتی و کاربرد معادله‌ی VFT، گران‌روی مینا در دمای پخت را برابر با ۱۰ $^{۳/۷۸۱}$ Pa.s تعیین کرد که در محدوده ی گران روی ایده‌آل برای میناها در دمای پخت قرار دارد. کشش سطحی مینای مذاب ۲٤۵/۱ mN/m و زاویه‌ی تماس با سطح ۱۳۵° بود که ترشوندگی مناسبی را می‌توانند ایجاد کنند.

مراجع

1. Marbaker, E., "Coatings for Wire-Wound Resistors", Am. Ceram. Soc, Vol. 28, pp. 329-342, (1945).
2. Jones, D., "Navy electricity and electronics training", naval education and training professional development and technology center, Washington, D.C., (1998).
3. Hailing, J., "Power wire-wound resistors", electronics and power, Vol. 29, pp. 244-245, (1983).
4. Hubertus, J., deceased, J.," wire-wound resistor", US patent NO.4406994, (1983).
5. Deyrup, A. J.," Enamels for resistors", US patent NO.2425032, (1944).
6. Costa, U., Electrical resistor with a polycrystalline ceramic cover and process for Manufacture, US patent NO. 3919682, (1975).
7. ASM Handbook. Vol. 2, “Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials”, pp. 822-839, (2000).
8. Hong, F., Holland, D., "Studies of interface reactions between glass ceramic coatings and metals", Non-crystalline solids, Vol. 112, pp. 357-363, (1989).
9. Grunling, H., Schneider, K., "Coating in industrial gas turbines: experience and further requirements", thin solid films, Vol. l84, pp. 1-15, (1981).
10. Hong, F., Holland, D., "Bonding glass ceramics to high temperature alloys, surface and coating technology", Vol. 39, pp. 19-27, (1989).
11. Goodman, G., "Porcelain enamel", US patent NO. 2481474, (1949).
12. Cahill, R.," Process for wire-wound resistor", US patent NO.2994945, (1957).
13. Zubekhin, A., Manysheva, E. and Ochkurova, L., "technological specifies of devitrified composite heat-resistant coatings for nichrome alloys", glass and ceramics, Vol. 57, pp. 30-33, (2000).

۱۴. میر محمد عباسیان، "صنعت لعاب سازی و رنگ های آن" ، انتشارات گوتنبرگ، صفحه ٦٦-٦٤، (۱۳۷۹).

15. Ahmed, M., Earl, D., "Characterizing glaze-melting behavior via HSM", Am. Ceram. Soc. Bull, Vol. 81, pp. 47-51, (2002).
16. Dumitrache, R., "melting behavior of feldspar porcelain glazes", U.P.B. Sci. Bull, Vol. 68, pp. 3-16, (2006).
17. Prabhu, A., Gary, L. and Vest, R., "viscosity and surface tension of a molten lead borosilicate glass", Am. Ceram. Soc, Vol. 58, pp. 144-145, (1975).
18. Fujino, S., Hwang, C. and Morinaga, Kenji., "density, surface tension and viscosity of PbO-B_2O_3-SiO_2 glass melts", Am. Ceram. Soc, Vol. l87, pp. 10-16, (2004).
19. Shartsiss, L., Spinner, S. and Smock, A., "Surface Tension of Compositions in the Systems PbO-B_2O_3 and PbO-SiO_2", Am. Ceram. Soc, Vol. 31, pp. 23-27, (1948).

۲۰. واهاک مارقوسیان، "شیشه: ساختار، خواص و کاربرد"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، صفحه ۲۲۵-۲۱۸، (۱۳۸٦).

21. Dietzel, A., "Emaillierung Wissenschaftliche Grundlagen and Grundzuge der Technologie", Springer Verlag., Berlin, pp. 352-358, (1981).